第 48 卷第 11 期
2020 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 11
November，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200128

定向分布钢纤维对超高性能混凝土的增强作用

苟鸿翔，朱洪波，周海云，杨正宏

(先进土木工程材料教育部重点实验室，同济大学，上海 201804)

摘　要：将细短钢纤维定向分布在水泥浆中制备超高性能混凝土(UHPC)，在不同的钢纤维体积掺量下，对比分析了定向分布钢纤维 UHPC(D-UHPC)与乱向分布钢纤维 UHPC(L-UHPC)的抗压、抗折和弯曲抗拉等强度，通过弯曲韧性、钢纤维与 UHPC 基体的界面黏结强度及宏观、细观照片来揭示其增强作用机理。结果表明：随着钢纤维掺量的增加，L-UHPC 的抗压强度先增大后减小，D-UHPC 的抗压强度则持续增大；两种 UHPC 的抗折强度均随着钢纤维体积掺量的增加而不断增大；在相同的钢纤维体积掺量下，D-UHPC 的抗折强度均比 L-UHPC 的更高；试样受弯断裂过程中，D-UHPC 所产生的裂缝宽度比 L-UHPC 的更窄，且出现了更多细小裂缝，可通过分散吸收荷载而表现出更高的弯曲韧性；D-UHPC 的初裂挠度、极限抗拉挠度、初裂强度、极限抗拉强度和韧性指数在相同的钢纤维体积掺量时均比 L-UHPC 的有大幅度增加；钢纤维的埋入角越大，拔出荷载峰值越小，且荷载峰值对应的挠度越大，显示出钢纤维方向对 UHPC 力学性能的显著影响。

关键词：钢纤维；定向分布；超高性能混凝土；力学性能；细观分析
中图分类号：TQ174.75　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)11–1756–09
网络出版时间：2020–09–18



Reinforcement of Directionally Distributed Steel Fibers on Ultrahigh Performance Concrete

GOU Hongxiang, *ZHU Hongbo*, *ZHOU Haiyun*, *YANG Zhenghong*
(Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Fine and short steel fiber was orientally distributed in the paste to prepare a ultra-high performance concrete (UHPC). The compressive strength, flexural strength, flexural tensile strength, and the interfacial bonding strength between steel fiber and UHPC matrix of the directionally distributed steel fiber UHPC (D-UHPC) and the disorderly distributed steel fiber UHPC (L-UHPC) at different volume contents of steel fiber were analyzed. The results demonstrate that the compressive strength of L-UHPC firstly increases and then decreases, and the compressive strength of D-UHPC continues to increase as the volume content of steel fiber increases. The flexural strength of both types of UHPCs improves with the increase of the volume content of steel fiber. At the same volume content of steel fiber, the flexural strength of D-UHPC is greater than that of L-UHPC. In the tensile fracture of the specimen, the crack width produced by D-UHPC is narrower than that of L-UHPC, and D-UHPC has more small cracks by dispersing and absorbing loads. The initial cracking deflection, ultimate tensile deflection, initial cracking strength, ultimate tensile strength, and toughness index of D-UHPC all increase, compared to that of L-UHPC at the same volume content of steel fiber. Increasing the embedding angle of the steel fiber decreases the peak value of the pull-out load and increases the deflection corresponding to the peak value of the load, thus indicating that the direction of the steel fiber affects the mechanical properties of UHPC.

Keywords: steel fiber; orientation distribution; ultra-high performance concrete; mechanical properties; mesoscopic analysis

超高性能混凝土(UHPC)已广泛用于道路和桥梁结构以增加刚度和疲劳寿命[1–2]，其优良性能主要得益于高掺量的钢纤维，通过优化钢纤维的几何形状，类型和体积掺量可增加其混凝土或砂浆的力学性能[3–9]，而通过定向分布钢纤维的增强作用则更高[10–12]。纤维方向效应系数(FDEC)常被用于表

收稿日期：2020–03–20。　修订日期：2020–07–24。
基金项目：国家“十三五重点研发计划”(2018YFC0705400，2018YFD1101002)。
第一作者：苟鸿翔(1995—)，男，硕士研究生。
通信作者：朱洪波(1965—)，男，博士，副教授。

Received date: 2020–03–20.　**Revised date:** 2020–07–24.
First author: GOU Hongxiang (1995–), male, Doctoral candidate.
E-mail: ghx950823@163.com
Correspondent author: ZHU Hongbo (1965–), male, Ph.D., Associate Professor.
E-mail: 08013@tongji.edu.cn

征纤维在混凝土中的定向分布水平，Dupont 等[13]和 Wuest 等[14]基于立体测量学原理，通过模型计算出传统 FDEC 仅为 0.4~0.5，严重降低了钢纤维的增强效率。于是，有研究[15–17]在活性粉末混凝土(RPC)中，通过不同方式来提高 FDEC，获得显著的增强增韧作用。Ozyurt 等[18]通过设计混凝土的流动性和振动成型时间，有效克服了自密实混凝土中纤维的偏析性，获得更好的机械性能；Stähli 等[19]采用多种纤维混合方式并结合一定的混凝土流变性方法提高 FDEC 和力学性能，认为 FDEC 略微增加 0.1 即可增加约 30%的抗折强度及约 50%的耗能能力。Kang 等[20]对比了端部浇筑和多点浇筑混凝土的方式，显示前者能将 FDEC 提高到 0.6~0.7，从而大幅度提高初裂强度、弯曲抗拉强度、弯曲韧性以及冲击韧性。慕儒等[21–22]利用均匀电磁场对塑性状态时混凝土中的钢纤维进行定向控制，将 FDEC 大幅度提高至 0.9，相比传统钢纤维定向分布混凝土的抗拉强度和抗弯强度均提高 100%以上。Li[23]发现当纤维长径比或者长度增加时，钢纤维会出现分散不良和纤维球化现象，严重降低弯曲性能。

然而，现有提高 FDEC 的方法只适用于普通混凝土或砂浆，而且只对较粗、较长的钢纤维有效，在实际应用中还会受重力影响使钢纤维沉降并导致其在混凝土中上下分布不均，下层钢纤维由于受上层混凝土的压力作用而难以定向排列，因此多数方法并不适合制备掺细短钢纤维的 UHPC，或其产生定向、均匀分布的作用有限。

为此，设计了新型钢纤维定向均匀分布装置和方法，可有效解决上述问题，在提高细短钢纤维增强增韧作用的同时降低工程成本；通过抗压、抗折、弯拉强度，以及韧性、钢纤维与基体界面黏结强度等性能测试，并通过细观性能测试分析了该方法定向分布钢纤维后对 UHPC 的增强作用机理。

1　实验

1.1　原材料

南京江南小野田水泥有限公司生产的 P·II 52.5 水泥，挪威产“艾肯”牌硅灰；粒径小于 5 mm 的河砂；长度 6 mm、直径 0.12 mm 的细短钢纤维。水泥与硅灰的化学成分见表 1。

表 1　水泥与硅灰的化学成分

Table 1　Chemical composition of cement and silica fume　　*w*/%

Material	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	TiO_2	MgO	SO_3	IL
Cement	20.99	4.43	3.44	66.41	0.29	0.87	2.40	1.17
Silica fume	97.77	0.22	0.07	0.46	0.01	0.44	0.16	0.87

w is mass fraction.

采用激光粒度分布测试仪测定水泥和硅灰的颗粒粒径分布及勃氏比表面积，结果见表 2。

表 2　水泥和硅灰的颗粒粒径分布及比表面积

Table 2　Particle size distribution (by volume) and specific surface area of cement and silica fume

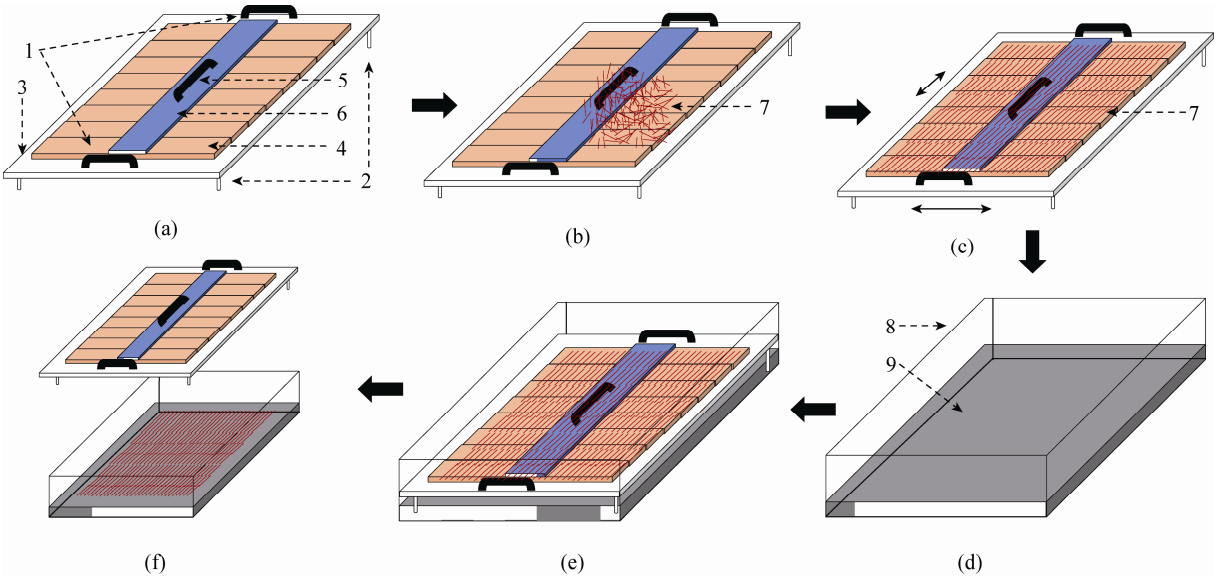
Material	Mean diameter/μm	Median diameter/μm	Specific surface area/($m^2 \cdot g^{-1}$)	Diameter /μm				
				<10%	<25%	<50%	<75%	<90%
Cement	16.15	12.68	0.64	2.68	5.66	12.68	23.68	34.40
Silica fume	12.73	11.95	14.98	5.78	8.20	11.95	16.51	20.84

1.2　制备

图 1 为钢纤维在水泥砂浆中定向分布的制备装置示意图及操作流程图。

该装置主要由平板、磁铁组块以及连接磁铁组块的铁块组成，如图 1a 所示。将钢纤维先散放在平板下，如图 1b (其中的钢纤维实际应处于平板下表面，见图 1c 和图 1e)，使钢纤维被磁铁组块吸附，紧贴在平板下表面；然后通过把手 5 左右、前后往复移动磁铁组块，利用磁铁中磁场分布原理使细短钢纤维均匀、定向地吸附于平板下表面(见图 1c)；将高流动性水泥砂浆注入成型模具中，自动铺满模具底部，如图 1d；通过把手 1 将平板、磁铁组块、铁块以及被吸附的钢纤维移动到水泥砂浆上(图 1e)，然后向上垂直移开磁铁组块和平板，钢纤维因失去磁力吸引而均匀定向地落入水泥砂浆中。重复上述操作，将水泥砂浆与细短钢纤维按所需的层数分层浇筑至设计厚度。

UHPC 配合比如表 3 所示，采用上述制备方法，将细短钢纤维按质量平均分布 8 层于水泥砂浆中，成型 4 cm×4 cm×16 cm 的棱柱试块，24 h 后脱模放置于标准环境[(20±2) ℃，相对湿度>95%]中进行养护备用，至指定龄期后取出进行相应测试。每组测试 3 个试样，取平均值，并以乱向分布细短钢纤维的 UHPC 设为对照组。细短钢纤维的定向排列情况如图 2 所示，其中左图为更清楚地呈现而将纤维定向分布在纸上。



1: Flat handle; 2: Flat support; 3: Handle; 4: Magnet block; 5: Iron block handle; 6: Iron block; 7: Fine and short steel fiber; 8: Forming mould; 9: Cement mortar

图 1 细短钢纤维定向分布的试验装置和操作流程

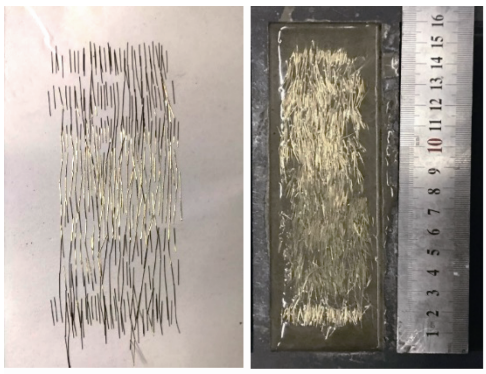
Fig. 1 Test device and operation flow of fine and short steel fiber orientation distribution

表 3 UHPC 配合比

Table 3 Mix ratio of UHPC

Sample No.	Mass ratio/g					
	Cement	Silica fume	Sand	Water	Superplasticizer	Fine and short steel fiber
L1	100	11.1	88.9	20.0	0.7	6.7
L2	100	11.1	88.9	20.0	0.7	8.0
L3	100	11.1	88.9	20.0	0.7	10.0
L4	100	11.1	88.9	20.0	0.7	12.0
D1	100	11.1	88.9	20.0	0.7	6.7
D2	100	11.1	88.9	20.0	0.7	8.0
D3	100	11.1	88.9	20.0	0.7	10.0
D4	100	11.1	88.9	20.0	0.7	12.0

L: UHPC with random distribution of steel fibers; D: UHPC with directional distribution of steel fibers.



(a) (b)

图 2 钢纤维在纸面上(a)和在水泥浆中(b)的定向分布

Fig. 2 Directional distribution of steel fibers on paper (a) and in cement slurry (b)

1.3 测试

抗压/抗折强度按照《水泥胶砂强度试验》(GB/T17671-1999)测试，采用万能试验机，加载速度为 0.8 MPa/s，记录试件最大抗压强度；抗折强度的计算公式为：

$$R_{\mathrm{f}}=\frac{1.5F_{\mathrm{f}}L}{b^3} \tag{1}$$

其中：R_{f} 为抗折强度(MPa)；b 为试件截面的高宽(40 mm)；L 为两个下支撑圆柱的中心间距(100 mm)；F_{f} 为折断时的荷载(N)。

采用 ZWSP-2KCH 型显微镜相机，对经抗折强度测试后的试块进行断裂面的宏观和细观形貌分析，并利用其测距功能测试裂缝宽度；弯曲抗拉强度和弯曲韧性测试分别参照 ASTM-C78[24]中弯拉强度的测试方法和 ASTM-C1018[25]中弯曲韧性试验方法(将标准中的混凝土试件改用砂浆试件)，按 3 点弯曲进行，加载速度 0.08 MPa/s，通过得到的荷载−挠度曲线来计算弯拉强度和 I_5、I_{10}、I_{20} 弯曲韧性指数。弯拉强度的计算公式为：

$$\sigma=\frac{\rho l_{\mathrm{s}}}{b_{\mathrm{s}}d_{\mathrm{s}}^2} \tag{2}$$

其中：σ 为弯曲抗拉强度(MPa)；ρ 为破坏载荷(N)；l_{s} 为支点中心间距(mm)；b_{s} 为试件宽度(mm)；d_{s} 为试件高度(mm)。而弯曲韧性指数的计算公式为图 3 中 3.0 δ、5.5 δ 和 10.5 δ 处曲线下的面积与 δ 处曲线下的面积之比，即：

$$I_5=\frac{S_{OACD}}{S_{OAB}} \tag{3}$$

$$I_{10}=\frac{S_{OAEF}}{S_{OAB}} \tag{4}$$

$$I_{20}=\frac{S_{OAGH}}{S_{OAB}} \tag{5}$$

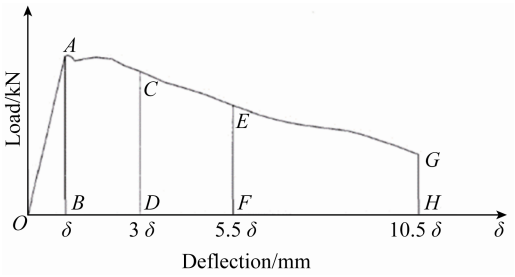


图 3　ASTM 标准中韧性指数计算示意图

Fig. 3　Schematic diagram of toughness index in ASTM standard

界面黏结强度测试参照《钢纤维与水泥砂浆粘结强度的试验方法》(CECS13-2009)、通过“8”字模成型试样，按照上述定向分布方法、将 60 根细钢纤维平均分 3 层定向铺于“8”字模最小横截面处，振动成型。分别设置钢纤维的定向埋入角度为 0°、30°、60°(与“8”字模最小横截面垂直方向的夹角)。在进行拉伸测试时，按 0.3 mm/min 的速度连续均匀加载。由于在拉伸试验中，试样断裂处可能位于钢纤维的任何位置，因此钢纤维的有效埋入长度是随机的，于是引入钢纤维有效长度系数 λ，按式(6)计算。

$$\lambda=\frac{L}{l} \tag{6}$$

式中：λ 为纤维有效长度系数；L 为钢纤维有效黏结长度(mm)；l 为钢纤维长度(mm)。

试样在发生断裂破坏时，通常是埋入基体长度较短的一端钢纤维被拔出，因此其与基体的粘结长度 $l'\leqslant l/2$，假设钢纤维沿拉应力方向均匀分布，则钢纤维埋入基体中的长度服从 0~$l/2$ 均匀分布，即 $l'\sim U(0,\ l/2)$。

$$f(l')=\frac{2}{l}\left(0\leqslant l'\leqslant\frac{l}{2}\right) \tag{7}$$

$$L=\int_0^{\frac{l}{2}} f(l')\mathrm{d}(l') \tag{8}$$

解公式(8)得 $L=l/4$，$\lambda=0.25$。

钢纤维与试样基体的界面黏结强度定义为，钢纤维与基体界面之间沿纤维径向的单位面积的黏结力，其数学表达式为式(9)：

$$F=\frac{f}{nu\lambda l} \tag{9}$$

式中：F 为钢纤维与混凝土的界面黏结强度(MPa)；f 为钢纤维拔出时的最大荷载(N)；n 为钢纤维的埋入数量；u 为钢纤维横截面周长(mm)；λ 为纤维有效长度系数；l 为钢纤维长度(mm)。

2　结果与讨论

2.1　抗压性能

图 4 为不同钢纤维体积掺量下，D 组和 L 组 UHPC 试样在 28 d 龄期的抗压强度及其两者的强度比率(D/L)。由图 4 可以看出，抗压强度随钢纤维掺量的增加，L 组试样先增后减，当掺量为 1.2%时最大，而 D 组试样持续增大；两者对比，D 组强度在钢纤维体积掺量低于 1.5%时都小于 L 组的，在 1.0%、1.2%和 1.5%这 3 种掺量下分别只有 L 组强度的 97%、90%和 99%，而当钢纤维体积掺量增大到 1.8%时则为 L 组的 109%。分析认为，对于乱向分布的钢纤维，在其体积掺量较小(1.0%~1.5%)时，会在基体中形成相对均匀的网络搭接结构，随着掺量的增加会对基体产生更大约束力，从而提高抗压强度，当其掺量过大时则使水泥浆体的和易性变差，导致钢纤维团聚，反而会因形成内部缺陷而导致抗压强度下降。文献[26]设计的普通细石混凝土中，短细纤维体积掺量从 0.6%至 1.2%，采用 100 mm×100 mm×100 mm 试件测试抗压强度，其测试结果显示钢纤维的最佳掺量为 0.8%，文献[27]测试了 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的 100~200 MPa 高强胶砂试样强度，认为纤维最佳掺量为 1%。可以看出，最佳掺量明显高于该两文献，可能是基础强度等级相差较大。在超低水胶比(0.18)的条件下，水泥石的密实性远高于文献的试样(其水胶比为 0.41)，因此水泥石对钢纤维的约束力高出很多，更容易体现

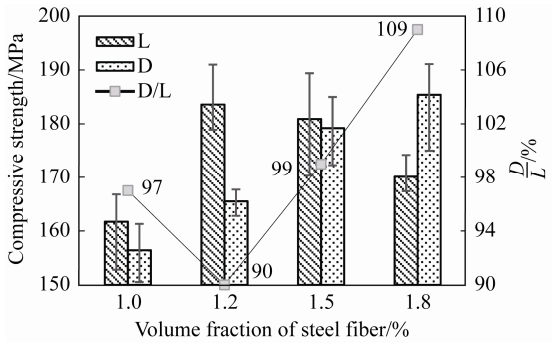


图 4　不同试样抗压强度及其强度比率

Fig. 4　Compressive strength of each group and strength ratio of D/L

纤维对基体抗压强度的贡献。定向分布方法避免了钢纤维团聚，当其掺量增加时可在浆体内部不断产生更高的环箍效应和对基体的更强约束作用，进而使抗压强度不断增加。

2.2 抗折性能

2.2.1 抗折强度 图 5 为不同钢纤维体积掺量下，D 组和 L 组试样在 28d 龄期的抗折强度及其强度比率。由图 5 可知，L 组和 D 组试样的抗折强度都随着钢纤维体积掺量的增加而不断增大，将纤维掺量从 1%提高掺量到 1.2%、1.5%和 1.8%时，L 组分别提高约 6%、41%和 76%，D 组分别提高约 23%、52%和 93%，D 组总体高于 L 组的增幅，特别是高掺量(1.8%)时的增强作用更显著。这与文献[27−29]针对活性粉末混凝土(RPC)的试验结果规律相似，但增幅存在差异，文献[28]中制备了强度等级为 C100 以上的 RPC，然后采用 100 mm×100 mm×400 mm 小梁试样测试 28 d 的抗折强度，其 1.5%纤维体积掺量试样的抗折强度为 1%掺量的 150%，文献[29]采用同样的 40 mm×40 mm×160 mm 砂浆棱柱试样进行测试，其 2%和 3%纤维体积掺量试样的抗折强度分别为 1%纤维掺量抗折强度的 112%和 117%。显然，相对于采用同尺寸试样测试的文献[29]数据，抗折强度随纤维掺量提高而增强的幅度更高。

文献[30]认为，在抗折测试中，受拉方向的钢纤维具有桥接裂缝的作用，能够有效抑制裂缝的扩展，而且当裂缝产生后，钢纤维通过与基体的界面粘结力把所受载荷向两侧未开裂的基体传递，最后钢纤维才被拔出或者断裂，然后使试样被折断。随着钢纤维体积掺量的增加，试样断面上的钢纤维增多，这些钢纤维共同作用，不断提高试样的抗折强度。

同时，在各相同的钢纤维掺量下，D 组试样的抗折强度均比 L 组试样高，提高幅度除了纤维掺量为 1%时超过 20%外，其他更高纤维掺量时都超过 30%。另外，从图 5 还可看出，L 组试样的数据误差较大，说明其试样内部的钢纤维分布不均，导致抗折数据的离散性较大。

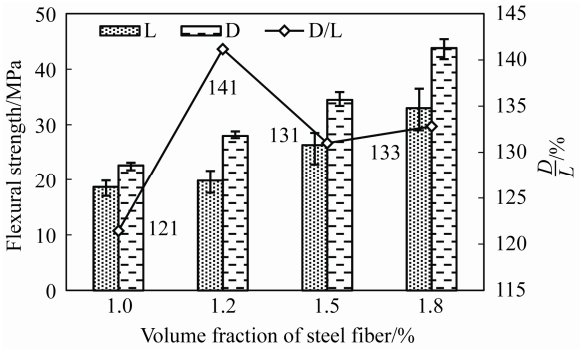


图 5 不同试样 28 d 龄期的抗折强度及其强度比率

Fig. 5 Flexural strength of each group and strength ratio of *D*/*L* at 28 d

2.2.2 断裂破坏分析 图 6 为不同钢纤维体积掺量的 D 组和 L 组试样在测试抗折强度后的表面形貌。对比图 6a 与图 6b 可以明显看出，L 组试样的裂缝均比 D 组试样更宽，即 L 试样受到弯曲应力断裂后更容易崩裂开。对比图 6c 的 2 种试样可以看出，D-UHPC 的断面纤维整齐定向排列，而 L-UHPC 的断面较难看到纤维，一是因其整齐排列比乱向分布更容易显示出来，二是由于其露出的数量明显较少，三则能够看出其露出部分的平均长度明显低于 D-UHPC 的。由此可得乱向分布的钢纤维在断裂面因数量少和长度短而对受力面支撑结构稳固性的作用不如定向分布的钢纤维。



(a) D-UHPC (b) L-UHPC (c) D-UHPC (left) and L-UHPC (right)

图 6 不同试样抗折断裂后的表面及断面

Fig. 6 Surfaces and sections of different specimens after fracture resistance

通过显微镜相机观察到的裂缝细观形貌及测试得到的裂缝宽度如图 7 所示。从图 7 可以看出，D 组试样不仅裂缝宽度更小，而且有的还在断裂处旁边出现了多条细小裂缝，这说明在定向分布钢纤维的试样中，钢纤维承受荷载和传递荷载的能力更强，能够将受力线的引力向线的两侧分散传递，使裂缝无法集中于一线发展，多条裂缝通过分散吸收荷载而表现出更高的弯曲韧性。文献[31]采用端勾型粗钢纤维制备 C40 和 C50 的细石混凝土，同样对比了纤维的单向与乱向分布的试样裂缝情况，得出与此一致的结果，说明钢纤维不论粗细，定向分布后都能产生同样的分散吸收应力能量进而增强的效果。

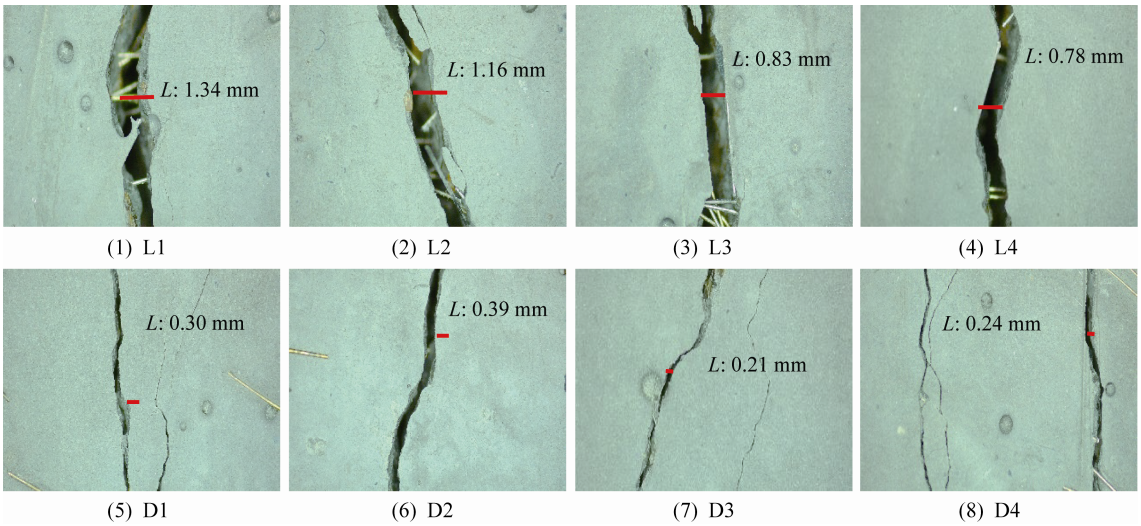


图 7　不同试样抗折裂缝的细观形貌

Fig. 7　Micro-morphology of flexural cracks of different samples

2.3　弯拉性能

2.3.1　荷载–挠度曲线　　图 8 为 4 种钢纤维体积掺量下，D 组和 L 组试样在 28 d 龄期的荷载–挠度曲线。对比图 8 中的 D 曲线与 L 曲线可以看出，在各相同的纤维掺量下，D 组试样初裂强度均明显比 L 组的大 1 倍左右，并且其部分初裂应变有大幅提升；试样初裂后，D 组试样的强度回落均比 L 组试样的更慢，特别是从图 8d 的放大小图中还能看出，最高掺量(1.8%)时 D 组试样在屈服平台的强度还能略微提升，显示出一定的应变硬化现象。文献[32]通过纳米碳纤维(CNF)来涂覆改性聚乙烯纤维(PE)，使 UHPC 的抗拉强度提高 15%，抗拉应变能力提高 20%，分析认为其涂覆碳纤维通过填充纳米孔隙和桥接纳米裂纹可增强界面摩擦强度，使微观组织更加致密，导致拉伸强度和拉伸应变能力的提高。相比来看，定向分布钢纤维方法对拉伸强度和拉伸应变能力的提升作用更加明显。文献[33]通过多元回归理论模型(MARS)对大量数据进行统计分析，详细阐述了纤维增强混凝土(FRC)中应变硬化现象的机理和影响因素，其中认为，提高纤维掺量是产生应变硬化现象的重要条件之一，但从图 8 的结果看，乱向分布的钢纤维在掺量提高到本研究范围的最高值时仍未出现该现象，由此可以说明钢纤维的定向分布对 RPC 弯曲韧性的有益作用。所有曲线都呈现出波动变化的趋势，这是因为钢纤维在弯拉过程中被拔出或者断裂产生的强度振荡反映。

2.3.2　弯曲抗拉强度　　图 9 为不同钢纤维掺量下，D 组和 L 组试样的初裂挠度(ICD)、初裂强度(ICL)、极限抗拉挠度(UCD)和极限抗拉强度(UCL)。从图 9 可以看出：相同钢纤维体积掺量下，D 组试样的初裂挠度、极限抗拉挠度、初裂强度和极限抗拉强度均比 L 组试样有大幅增加；其中，极限抗拉强度分别增加 51%、88%、74%和 39%，钢纤维体积掺量为 1.0%和 1.5%时的初裂挠度都提高接近 2 倍，充分显示出定向分布钢纤维对 UHPC 的弯曲抗拉强度的显著改善作用。文献[34]以“增强因子”(相同掺量下，定向钢纤维水泥砂浆抗弯强度与乱向分布的抗弯强度之比)来评价定向纤维的增强水平，对于不同的 UHPC 配合比，初裂和极限增强因子均随纤维体积掺量的增加而增加，其中，对于 0.36 水胶比系列的初裂强度的增幅因水胶比不同而明显低于本研究结果，对极限抗弯强度的增幅则与本研究的接近。

分析认为，试样中的定向钢纤维均与拉应力的

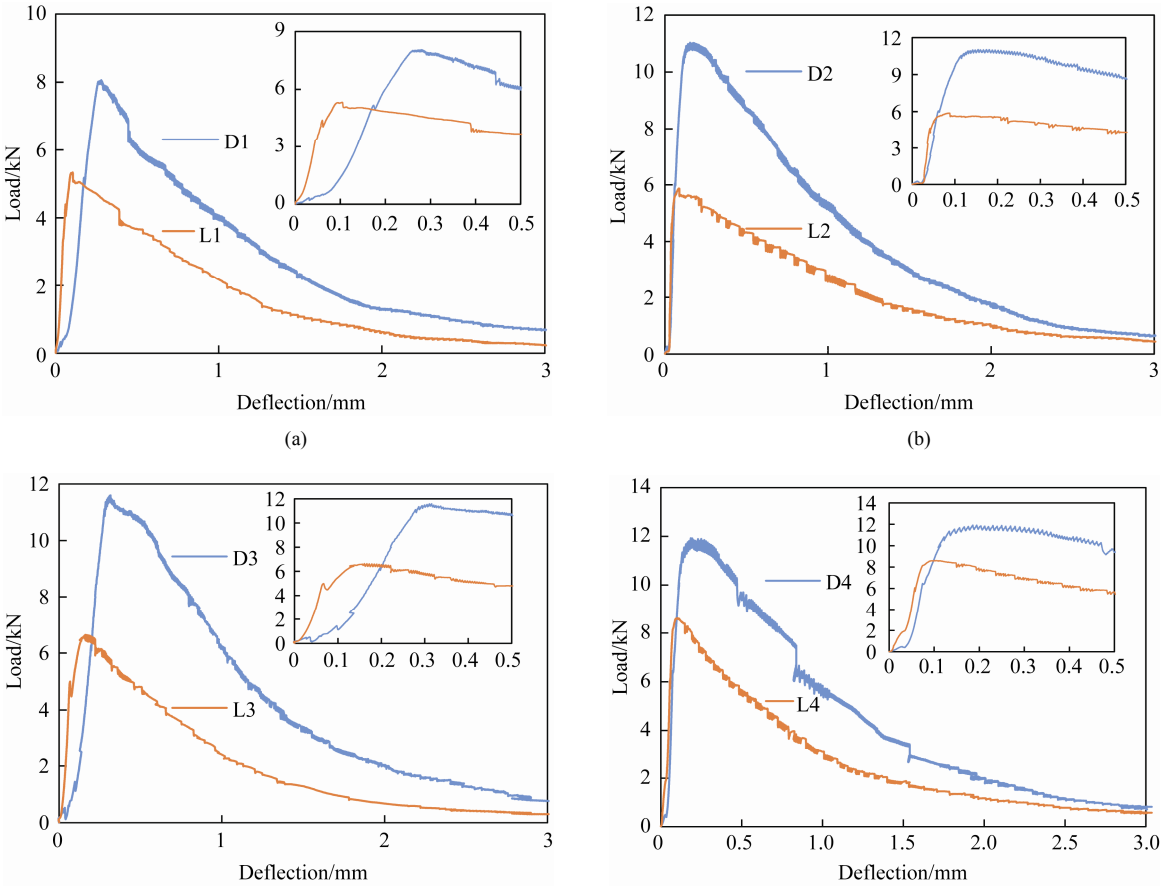


图 8 4 种纤维掺量试样的荷载-挠度曲线

Fig. 8 Load-deflection curves of samples with 4 kinds of dosage of fiber

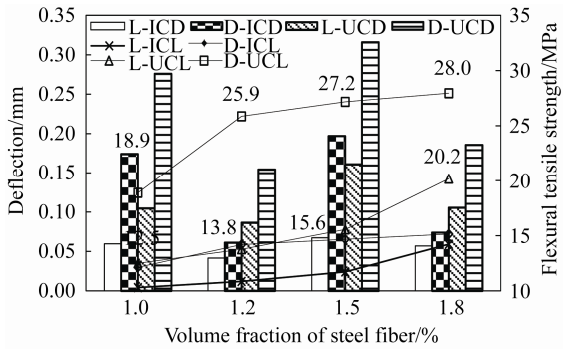


图 9 不同试样的特征点挠度及其对应的弯曲抗拉强度

Fig. 9 Deflection of definite points and corresponding flexural tensile strength of different samples

方向一致，使得桥接在开裂面的钢纤维数量增多，钢纤维的嵌入长度增加，提高了钢纤维的增强效率，这证实了 2.2.2 中得出的结论。

2.3.3 弯曲韧性指数 各试样在不同钢纤维体积掺量下的韧性指数 I_5、I_{10} 和 I_{20} 计算结果如图 10。图 10 显示，相同钢纤维体积掺量下，D 组试样的 I_5、I_{10} 以及 I_{20} 值均高于 L 组试样，总体表现为钢纤维掺量越高、提高幅度越大的趋势，最高钢纤维体积掺量(1.8%)的增强比率分别为 63%、83%和 93%。

UHPC 的增韧作用主要来自钢纤维在拔出过程中两方面的耗能：一是克服界面黏结力耗能，二是克服界面摩擦力而耗能[31]。定向分布钢纤维所产生的界面黏着力和摩擦力耗能增加是其显著改善 UHPC 韧性的重要因素。

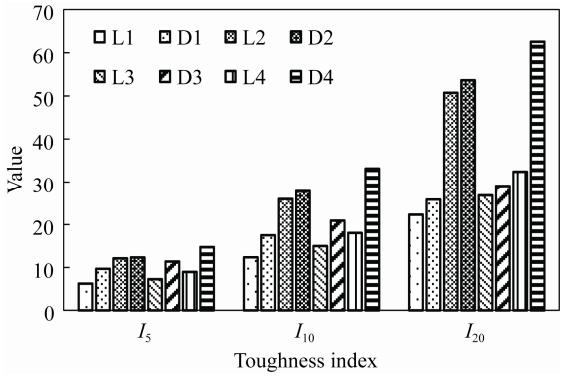


图 10 不同试样的韧性指数

Fig. 10 Toughness index of different samples

2.4 纤维拔出性能

图 11 为钢纤维在不同埋入角下的拔出荷载-位移曲线。可以明显看出，钢纤维的埋入角越大，拔出荷载最大值越小，且荷载最大值点相应的位移越大，不过从图 11 中的峰值位移放大图看出，以 30°和 60°埋入纤维的试样在荷载达到峰值前有一段缓慢增加的过程。由式(9)可计算出钢纤维 0°、30°和 60°埋入角所对应的界面黏结强度分别为 18.5 MPa、12.5 MPa 和 10.5 MPa，0°的试样界面黏结强度相比 30°和 60°的分别增加了 48%和 76%，表现出钢纤维在基体中的取向对强度的显著影响。文献[35]采用 2 种端勾型和直线型粗钢纤维进行的同类实验，结果都表明纤维与受力同向分布所产生的拔出力值明显大于同类型、同掺量、乱向分布的，说明对于不同形状和粗细的钢纤维以及不同强度等级的纤维增强混凝土来说，按照其受力方向设置同向的纤维分布都是提高纤维混凝土力学性能的可靠方法。产生这些现象的主要原因：一方面有文献[36−37]指出，是由于在基体中倾斜埋入钢纤维时，其与基体的界面处产生附加的剪应力，使钢纤维内部原子产生位错运动而滑移，降低了钢纤维的屈服强度和极限强度，因此荷载最大值减小。在这种情况下，钢纤维能显示出更好的韧性使荷载最大值对应的位移增大。另一方面是由于钢纤维倾斜埋入基体时，处于钢纤维埋入处的基体在受到外界压力时更容易被压碎，导致钢纤维与基体在受力方向的界面粘结能力降低。同时斜向钢纤维在试样受拉时会沿受力方向被拉直，于是其荷载峰值对应的位移更大。

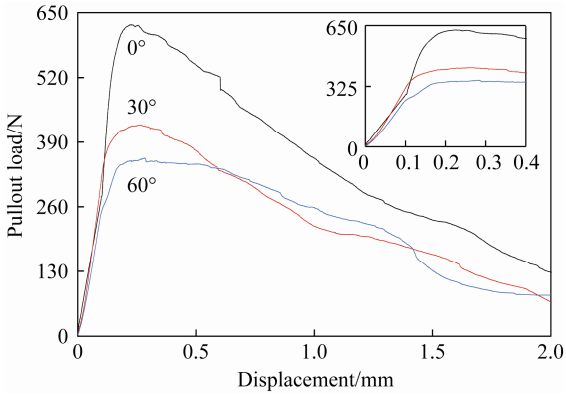


图 11　钢纤维在不同埋入角下的拔出荷载–位移曲线

Fig. 11　Pullout load-displacement curves of steel fibers at different embedding angles

3　结论

1) 随着钢纤维体积掺量的增加，L-UHPC 的抗压强度先增大后减小，D-UHPC 的抗压强度则持续增大。当钢纤维体积掺量为 1.8%时，D-UHPC 抗压强度高于 L-UHPC。

2) D-UHPC 和 L-UHPC 的抗折强度均随着钢纤维体积掺量的增加而增大，在各个相同的钢纤维掺量下，D-UHPC 的抗折强度均比 L-UHPC 的更高，抗折强度提高幅度除了纤维掺量为 1%时为 20%左右，其他更高纤维掺量时都超过 30%。试样受弯、断裂后，D-UHPC 所产生的裂缝宽度比 L-UHPC 的更窄，且出现了更多细小裂缝，说明钢纤维定向分布后可承受荷载和传递荷载的能力更强，可通过分散吸收荷载而表现出更高的弯曲韧性。

3) D-UHPC 的初裂挠度、极限抗拉挠度、初裂强度和极限抗拉强度均比 L-UHPC 的大幅度增加，其中，极限抗拉强度分别在 4 种钢纤维掺量下增加 51%、88%、74%和 39%，钢纤维体积掺量为 1.0%和 1.5%时的初裂挠度都提高接近 2 倍；D-UHPC 的韧性指数 I_5、I_{10} 以及 I_{20} 值均高于 L-UHPC 的，且钢纤维掺量越高、提高幅度越大，钢纤维体积掺量为 1.8%的提高比率分别为 63%、83%和 93%。

4) 钢纤维的埋入角越大，拔出荷载最大值越小，且荷载最大值点相应的挠度越大，显示出钢纤维方向对 UHPC 的显著影响。

参考文献:

[1] PING G C, GUANG Y E, WEI S. Ultrahigh performance concrete–properties, applications and perspectives[J]. Sci China Technol Sc, 2015, 58(4): 587–599.

[2] AKKAYA Y, SHAH S P, GHANDEHARI M. Influence of fiber dispersion on the performance of micro-fiber reinforced cement composites[J]. Int Concr Abstr Portal, 2003, 216: 1–18.

[3] EZELDIN A S, BALAGURU P N. Normal and high-strength fiber-reinforced concrete under compression[J]. J Civ Eng, 1992, 4(4): 415–429.

[4] JIANMING G, WEI S, KEIJI M. Mechanical properties of steel fiber-reinforced, highstrength lightweight concrete[J]. Cem Concr Comp, 1997, 19 (4): 307–313.

[5] NATARAJA M C, DHANG N, GUPTA A P. Stress–strain curve for steel-fiber reinforced concrete under compression[J]. Cem Concr Comp, 1999, 21(5): 383–390.

[6] SONG P S, WANG H S. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete[J]. Constr Build Mater, 2004, 188(9): 669–673.

[7] YAZICI S, INAN G, TABAK V. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC[J]. Constr Build Mater, 2007, 21(6): 1250–1253.

[8] WILLE K, TUE N V, PARRA-MONTESINOS G J. Fiber distribution and orientation in UHP-FRC beams and their effect on backward analysis[J]. Mater Struct, 2014, 47(11): 1825–1838.

[9] CHIANG C R. A statistical theory of the tensile strength of short-fiber-reinforced composites[J]. Compo Sci Technol, 1994, 50(4):

479–482.

[10] GETTU R, GARDNEER D R. Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens[J]. Mater Struct, 2005, 38(1): 31–37.

[11] KIM J K, KIM J S, HA G J, et al, Tensile and fiber dispersion performance of ECC (Engineered Cementitious Composites) produced with ground granulated blast furnace slag[J]. Cem Concr Res, 2007, 37(7): 1096–1105.

[12] ZANDI Y, HUSEM M, PUL S. Effect of distribution and orientation of steel fiber reinforced concrete[C]//Proceedings of the 4th WSEAS international conference on Energy and development - environment - biomedicine. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2011: 9–14.

[13] DUPONT D, VANDEWALLE L. Distribution of steel fibres in rectangular sections[J]. Cem Concr Compos, 2005, 27(3): 391–398.

[14] WUEST J, DENARIE E, BRUHWILER E, et al. Determination of fibre distribution and orientation in fiber reinforced composites[J]. Exper Technol, 2009, 33(5): 50–55.

[15] YOO DY, BANTHIA N. Effect of fiber orientation on the rate-dependent flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete[J]. Compo Struct, 2016, 157: 62–70.

[16] YOO D Y, BANTHIA N. Predicting the flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete[J]. Cem Concr Compos, 2016, 74: 71–87

[17] YOO D Y, KANG S T, YOON Y S. Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC[J]. Constr Build Mater, 2014, 64: 67–81.

[18] OZYURT N, MASON T O, SHAH S P, Correlation of fiber dispersion, rheology and mechanical performance of FRCs[J]. Cem Concr Compos, 2007, 29(2): 70–79.

[19] STAHLI P, SUTTER M, MIER J. Improving the Mechanical Properties of HFC by Adjusting the Filling Method[C]. Proceedings of the Fifth International RILEM Workshop'HPFRCC5', 2007: 23–30.

[20] KANG S T, KIM J K. The relation between fiber orientation and tensile behavior in an ultra high performance fiber reinforced cementitious composites(UHPFRCC)[J]. Cem Concr Res, 2011, 41(10): 1001–1014.

[21] MU R, LI H, QING L, et al. Aligning steel fibers in cement mortar using electro-magnetic field[J]. Constr Build Mater, 2017, 131: 309–316.

[22] 慕儒, 邱欣, 赵全明, 等. 单向分布钢纤维增强水泥基复合材料(Ⅰ): 钢纤维方向控制[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(2): 208–213.
MU Ru, QIU Xin, ZHAO Quanming, et al. J Build Mater (in Chinese), 2015, 18(2): 208–213.

[23] LI V C. Tailoring ECC for special attributes: A review[J]. Int J Concr Struct Mater, 2012, 6(3): 135–144

[24] ASTM. ASTM C 78 Standard Test Method for Flexural Performance of concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)[S]. US: ASTM, 2015.

[25] ASTM. ASTM C 1018 Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber reinforced concrete (using beam with third-point loading)[S]. US: ASTM, 1997.

[26] 章四明. 钢纤维掺量对钢纤维混凝土强度的影响[J]. 建筑科学, 2008, 24(3): 36–38.
ZHANG Siming. Build Sci (in Chinese), 2008, 24(3): 36–38.

[27] 薛刚, 张夏. 钢纤维掺量对活性粉末混凝土基本力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(3): 934–938.
XUE Gang, ZHANG Xia. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2018, 37(3): 934–938.

[28] 杨志慧. 不同钢纤维掺量活性粉末混凝土的抗拉力学特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
YANG Zhihui. Study on tensile mechanical properties of reactive powder concrete with different steel fiber content (in Chinese, dissertation). Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006.

[29] 苏家伦, 吴炎海, 林清. 钢纤维活性粉末混凝土弯曲抗折性能试验研究[C]. 全国结构工程学术会议, 2009: 9–13.
SU Jialun, WU Yanhai, LIN Qing. Experimental study on flexural flexural properties of steel fiber reactive powder concrete[C]//National Conference of Structural Engineering, 2009: 9–13.

[30] 鞠彦忠, 王德弘, 李秋晨. 钢纤维掺量对活性粉末混凝土力学性能的影响[J]. 实验力学, 2011, 26(3): 254–260.
JU Yanzhong, WANG Dehong, LI Qiuchen. J Experiment Mechan (in Chinese), 2011, 26(3): 254–260.

[31] 慕儒, 王成, 李辉. 单向分布钢纤维增强水泥基复合材料(Ⅲ): 断裂性能[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1): 78–82.
MU Ru, WANG Cheng, LI Hui. J Build Mater (in Chinese), 2016, 19(1): 78–82.

[32] HE S, QIU J, LI J, et al. Strain hardening ultra-high performance concrete (SHUHPC) incorporating CNF-coated polyethylene fibers[J]. Cem Concr Res, 2017, 98: 50–60.

[33] LI J, YANG E H. Probabilistic-based assessment for tensile strain-hardening potential of fiber-reinforced cementitious composites[J]. Cem Concr Compos, 2018, 91: 385–392.

[34] 景阳. 定向钢纤维水泥砂浆劈拉与弯拉性能试验研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2016.
JINGYang. Experimental study on splition tensile and flexural tensile properties of aligned steel fiber reinforced cement mortar (in Chinese, dissertation). Tianjin: Hebei University of Technology, 2016.

[35] 王晓伟. 异形钢纤维与混凝土粘结机理及其增韧效应研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2003.
WANG Xiaowei. Study on the bond mechanism of deformed steel fiber and concete and toughning effect (in Chinese, dissertation). Tianjin: Hebei University of Technology, 2003.

[36] BANTHIA N, FRANEOIS J. Concrete reinforced with deformed steel fibers, Part I: Bond-slip Mechanisms[J]. ACI Mater J, Sep-Oct, 1994: 435–446.

[37] LI V C. WANG Y, BACKERS. Effect of inclining angles bundling and surface treatment on synthetic fiber pull-out from cement matrix[J]. Composites, VZI, 1990(2): 132–140.